干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于卫星资料的气溶胶对冰云影响及分布特征分析

范学伟[1]， 郑有飞[1,2,3]， 王立稳[1]
（1. 南京信息工程大学大气物理学院，江苏 南京 210044；
2. 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室，江苏 南京 210044；
3. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心，江苏 南京 210044）

摘 要：通过利用2010年1月—2016年12月CALIOP（the Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization）冰云和气溶胶3级月平均产品和MODIS（Moderate-resolution imaging spectroradiometer）大气3级日平均产品研究气溶胶和冰云空间分布特征及气溶胶对冰云的影响。结果表明：纬度与冰云的分布密切相关，在热带附近的高空区域冰云样本数存在极大值区，随着纬度增加，冰云样本数的最大值和大值区所处的高度也在逐渐减小，且南北半球存在差异；气溶胶在地面附近以赤道为对称的低纬度地区存在极大值，北半球气溶胶能发展到5 km左右，而南半球在3 km左右；气溶胶与冰云随时间变化趋势较为一致，冰水含量和冰云粒子半径随时间变化存在相反的关系，气溶胶与冰水含量和冰云粒子半径的变化在时间上没有较好对应；清洁区域由于海盐粒子作用表现出较大的气溶胶光学厚度，但这不影响清洁区具有较小的冰云光学厚度；气溶胶促进了0 ℃~-10 ℃和-20 ℃~-40 ℃之间的冰云形成；随着温度降低，云中冰水含量减小，冰云粒子半径增大，在污染区域，冰水含量相对于清洁区域更小，冰云粒子半径也小于清洁区域。

关 键 词：冰云；气溶胶；卫星资料；冰水含量；有效粒子半径
文章编号：

气溶胶-云-辐射之间的相互作用是气候系统中最不确定的因素之一，也是当前气候研究中的一个难题。气溶胶粒子可以作为云凝结核或冰核改变云的微物理和辐射性质以及云的寿命[1]。冰云覆盖了全球约20%~30%的区域，它对于地球能量平衡和气候系统有重要作用[2]。冰云的形成与冰核（IN）密切相关，而气溶胶作为有效的冰核对冰云的形成和发展产生至关重要的影响[3]。

冰云形成涉及同质核化和异质核化（接触冷冻，浸没冷冻，冷凝成核和沉积成核），在低于-38 ℃的温度下，通过同质核化和异质核化形成冰粒。在高于-38 ℃的温度下，冰粒完全由异质核化形成[4]。在多尘的空气条件下比在无尘的空气条件下，通常观察到更多的冰云，其云顶温度在-20 ℃~-10 ℃之间[5]。Seifert等[6]发现不同污染地区异质冻结温度存在很大差异。较低温度下的气溶胶在大气中引发结冰，除了气溶胶特性（数量浓度、大小、气溶胶类型），环境气象条件（温度、相对湿度、垂直运动、湍流混合），以及云属性本身（液滴浓度和大小、动力学特性）控制着云中的液态水凝结。作为云凝结核或冰核的气溶胶敏感地影响这些云过程。然而，这种影响有多大还不确定，有必要给予进一步的研究。

此前的研究对气溶胶与水云的互相作用研究较多，气溶胶对冰云的宏微观物理量影响还没有太多的研究。近年来利用气候模式研究气溶胶间接气候效应成为了非常重要的方法。目前，气溶胶的间接气候效应还存在很大的不确定性。自20世纪50年代以来的实验室研究表明，矿物尘埃颗粒是有利的冰核，并且可能对云和降水过程产生重大影响，研究表明气溶胶增多会抑制暖云降水反而增强

收稿日期：2019-06-06； **修订日期：**2019-10-16
基金项目：国家自然科学基金项目（41590873）资助
作者简介：范学伟（1994-），男，安徽人，硕士研究生，研究方向为环境与气候变化. E-mail: 2434321846@qq.com
通讯作者：郑有飞（1959-），男，博士，教授，博士生导师，主要从事气候变化与环境气象方面的研究. E-mail: zhengyf@ nuist.edu.cn

冰云降水[7-9]。范学伟等[10]利用CALIPSO资料研究中国区域异质核化冰云比例进行分析，结果表明中国南北部冰云的比例有明显差异。杨磊等[11]通过地面观测探究了南京地区冰核与不同粒径段气溶胶浓度的关系，研究表明较大粒径的气溶胶的表面积浓度与冰核相关性较高。

星载主被动传感器资料是科学研究中数据的重要来源,得到了广泛的应用。王文彩等[12]使用A-Train卫星数据研究了沙尘气溶胶与云之间的互相作用，研究表明，沙尘气溶胶可以改变云的微物理特性，减少云滴粒子半径和液态水路径。马月等[13]使用CloudSat和MODIS（Moderate-resolution imaging spectroradiometer）数据研究了气溶胶对层积云的影响，对于相同的液态水路径，气溶胶增加可以使得云滴的尺度减小。彭杰等[14]结合CloudSat对云的主动观测和MODIS对气溶胶的被动反演，研究发现气溶胶对大陆性和海洋性站点的云均有显著影响。郑倩等[15]和邓军英等[16]分别利用MODIS资料和CloudSat资料结合降水数据分析了降水过程中冰云的宏微观物理量的特征，并探讨其与降雨强度的关系。上述研究表明星载主被动传感器资料非常适合研究冰云与气溶胶特性，相比基于地面的观测系统具有以下优点：具有较高的空间和较长的时间覆盖率，能够实现对冰云和气溶胶特性的全方位高分辨率的观测。

在探究气溶胶对冰云影响的研究中，我们专注于温度高于-40 ℃以上形成的冰云，这部分冰云必须有气溶胶作为冰核参与由异质核化形成。本文利用7 a的CALIOP和MODIS观测资料，分析气溶胶和冰云的空间分布特征，研究气溶胶对冰云的影响，为冰云和气溶胶的关系在气候模式中的应用做出贡献。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

在北半球中高纬度地区，自由对流层的气溶胶条件在很大程度上取决于北美、欧洲和东亚的人为污染，非洲、美洲和亚洲的沙漠尘埃排放，以及35°~65°N纬度带的森林火灾和其他生物质燃烧烟雾的释放[17]。此外，生物材料（花粉、细菌、叶片）也可能成为有效的冰核。在南半球高纬度偏远海洋区域（>50°S）气溶胶浓度是相当低的，虽然主要的粒子源是海洋，但它们位于南极低压带，一年中的大部分时间里都会产生西风。因此，海洋气团主导整个对流层的气溶胶条件，但缺乏有利的粗模式IN的来源。气溶胶粒子即使广泛存在，最有利的大型IN也可能已经被干湿沉降去除[18]，清洁的海洋条件在这里占主导地位。据此我们选择了4个研究区域：区域Ⅰ：40°~60°S，60°~90°E；区域Ⅱ：40°~60°S，120°~150°W；区域Ⅲ：40°~60°N，90°~120°E；区域Ⅳ：40°~60°N，90°~120°W。区域Ⅰ和区域Ⅱ代表着清洁的区域类型，区域Ⅲ和区域Ⅳ代表着污染的区域类型。

1.2 资料

美国宇航局NASA的A-Train卫星群由一组轨道相近卫星组成。A-Train的卫星配备了各种地球观测仪器，并提供了有关气溶胶、云、温度、相对湿度和辐射通量的全球观测数据，这些测量相互补充，提供了相对全面的地球大气层视图。CALIOP和MODIS是A-Train卫星群上2个重要观测仪器，由于它们具有相同的运行轨道和约1 min的运行时差，进而结合两者的观测数据能够在大范围或多地区研究气溶胶和云的相互作用。

CALIPSO卫星上搭载着3个天体观测仪器：具有正交偏振的云气溶胶激光雷达（CALIOP），红外成像辐射计（Infrared imaging radiometer，IIR）和宽视场相机（Wide field camera，WFC）。CALIOP是第一个星载偏振激光雷达，它可以观测全球范围内气溶胶、云的空间结构及特性，该激光雷达能帮助人们测量气溶胶粒子的含量和颗粒的大小，它提供的颗粒物532 nm的退偏振信息可以区分冰云和水云，同时能准确确定气溶胶层和云的海拔高度[19]。CALIOP激光雷达测量提供全球气溶胶和云的高垂直分辨率剖面，在8.2 km以下CALIOP的垂直和水平分辨率分别为30 m和333 m，在8.2 km和20.2 km之间垂直和水平分辨率分别为60 m和1000 m[20]。在这项工作中，CALIPSO 3级数据集用于检测大气气溶胶和冰云的样本数与光学厚度及冰云冰水含量，样本数的定义为纬度/经度/高度网格单元中样本的数量，以计数为单位。

搭载于Terra卫星和Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪（MODIS）是美国地球观测系统（EOS）用于观测全球生物和物理过程的重要仪器，MODIS主要对太阳辐射、大气、海洋和陆地进行综合观测，MO-

DIS是当前世界上新一代"图谱合一"的光学遥感仪器,有36个离散光谱波段,光谱范围从0.4 μm(可见光)到14.4 μm(热红外)全光谱覆盖。在这项工作中,MODIS 3级产品用于确定冰云有效粒子半径大小。

1.3 方法

本文利用2010年1月—2016年12月CALIOP冰云3级月平均产品(CAL_LID_L3_Ice_Cloud)、气溶胶3级月平均产品(CAL_LID_L3_APro)和MODIS大气3级日平均产品(MOD08_D3)研究气溶胶对冰云形成的影响。冰云3级产品参数均来自CALIOP 2级5 km云剖面产品,水平分辨率为2.5°×2.0°,垂直分辨率为120 m,所用资料每个垂直剖面上共有170层,即垂直探测范围是从地面到大约20 km高度;3级气溶胶产品参数均来自CALIOP 2级气溶胶曲线产品,水平分辨率为5°×2°,垂直分辨率为60 m,所用资料每个垂直剖面上共有207层,即垂直探测范围是从地面到大约12 km高度;MODIS大气3级产品主要由气溶胶、云、水汽和大气廓线4种MODIS 2级产品统计得到,水平分辨率为1°×1°,提供多种时间尺度的数据,其中包括云相态、云粒子尺度、云光学厚度、云水路径、气溶胶光学厚度等多种参数。

研究气溶胶对冰云影响的方法是对比北半球中高纬和南半球中高纬地区对流层低层和中层的冰云属性。在这项研究中,冰云(F_{ice})和水云(F_{water})的比例定义为:

$$F_{ice} = N_{ice}/(N_{ice} + N_{water} + N_{mix}) \tag{1}$$

式中: N_{ice} 、N_{water} 和 N_{mix} 分别是冰云、水云和混合相态云的样本数量。

对卫星数据的使用分以下步骤:(1)研究气溶胶与冰云的全球分布,以4个区域为研究对象研究气溶胶对冰云的影响;(2)从MODIS观测资料获取气溶胶光学厚度、冰云光学厚度、冰云有效粒子半径;(3)从CALIOP观测资料获取气溶胶样本数、冰云样本数和冰水含量;(4)研究气溶胶对云特性的影响。

通过上述方法,将CALIOP和MODIS观测的冰云和气溶胶特性相联系,据此研究气溶胶对冰云的影响。

2 结果与分析

2.1 气溶胶和冰云样本数空间分布

冰云的时空分布对地气系统的辐射有很大影响,为了更好地揭示冰云的垂直结构,图1显示了冰云样本数的纬度-垂直横截面的年平均全球分布图。纬度与冰云的分布密切相关。在热带附近,冰云样本数远高于其他地区,大值集中在海拔10~15 km附近,且东半球相对于西半球较高,在5 km以下冰云很少发生,在南半球中高纬度地区冰云发生的高度相对于北半球更高;随着纬度增加,冰云样本数的最大值和大值区处于的高度也在逐渐减小,在50°N时逐渐减小至6 km左右,且随着纬度的增加,冰云发生的最低高度也在降低,极地地区地面附近冰云也能发生;除了极地地区外,冰云很难发展到20 km以上,大部分冰云都处在15 km以下。整体来看主要是由于赤道地区温度较高,水汽蒸发旺盛,冰云发生概率较高,但是由于温度较高,冰云发生的高度也会变高,向两极地区各项数据均逐渐减

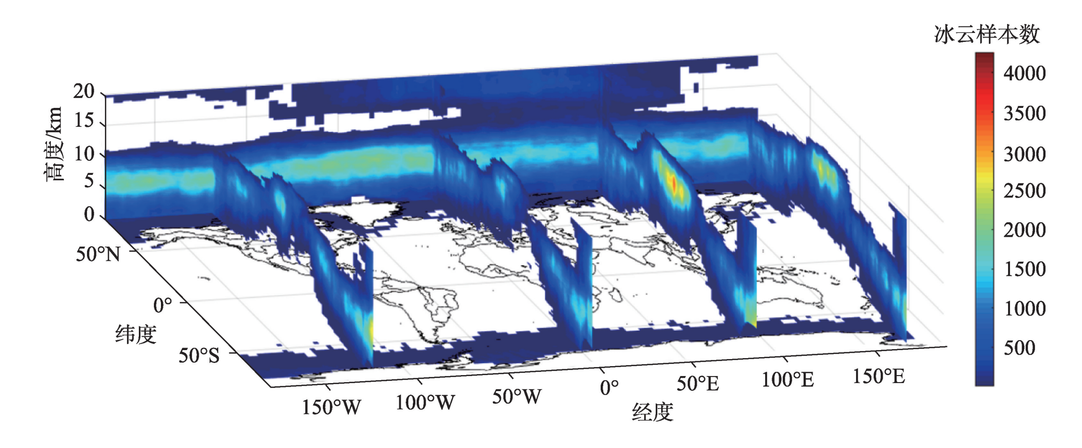


图1 冰云样本数的纬度-垂直横截面的年平均全球分布图

Fig. 1 Annual average global distribution of latitude-vertical cross-sections of ice cloud samples

小。这里的研究与杨冰韵的研究相当[21]。

为了验证气溶胶在南北中高纬空间分布特征，图2给出了气溶胶样本数的纬度-垂直横截面的年平均全球分布图。气溶胶在南北半球存在一定差异。图中可以发现气溶胶在地面附近以赤道为对称的低纬度地区存在极大值，且大值区都位于海洋上，陆地相比于海洋上气溶胶数量较小，在海面附近，这里存在大量海水飞沫，海水飞沫中含有硫酸盐和海盐粒子，它们是有效的气溶胶粒子。陆地部分地区海拔高于0 km，0 km处位于地表以下，卫星无法检测到气溶胶，所以数据出现空白样本。在高空，北半球气溶胶能发展到5 km左右，而南半球在3 km左右；北半球气溶胶样本数较小的大陆，气溶胶大值区能上升到较高的高度，达到5 km以上，而在南半球气溶胶数较高的海洋，气溶胶大值区并没有上升到较高的高度，基本位于海平面附近。

2.2 气溶胶和冰云微物理参数时间分布

冰云微物理参数主要包括有效粒子半径、冰水含量、冰水路径和光学厚度等，本文选取了有效粒子半径和冰水含量来研究气溶胶对冰云微物理参数的影响(图3)。从图3看出4个区域的4个参数的月平均值变化，4幅图从上到下依次显示的是冰云有效粒子半径、冰水含量、冰云样本数和气溶胶样本数。区域Ⅰ气溶胶和冰云样本数在每年的7—8月达到峰值，每年的1—2月达到谷值，冰水含量(冰云有效粒子半径)在每年的7—8月和12月达到峰值(谷值)，每年的1—2月达到谷值(峰值)；区域Ⅱ气溶胶和冰云样本数在每年的7—8月达到峰值，每年的12月或次年1月达到谷值，冰水含量(冰云有效粒子半径)在每年的7—8月和12月达到峰值(谷值)，每年的5月达到谷值(峰值)；区域Ⅲ气溶胶和冰云样本数在每年的1—2月达到峰值，每年的7—8月达到谷值，冰水含量(冰云有效粒子半径)在每年的7—8月达到峰值(谷值)，每年的12月或次年1月达到谷值(峰值)；区域Ⅳ气溶胶和冰云样本数在每年的4月左右达到峰值，每年的8—9月达到谷值，冰水含量(冰云有效粒子半径)在每年的7—8月达到峰值(谷值)，每年的12月或次年1月达到谷值(峰值)。可以发现：(1) 每个区域内气溶胶样本数与冰云样本数变化趋势较为一致，气溶胶样本数显示峰值和谷值对应的时间冰云样本数也显示相应的峰值和谷值，个别时间略有差异；(2) 每个区域的冰水含量和冰云有效粒子半径存在相反的关系，在冰水含量达到峰值时，冰云有效粒子半径达到谷值，在冰水含量达到谷值时，冰云有效粒子半径达到峰值；(3) 气溶胶样本数与冰水含量和冰云有效粒子半径的峰值与谷值在时间上并没有很好的对应(除区域Ⅰ以外)，存在时间差异，即气溶胶样本峰值与冰水含量(冰云有效粒子半径)的峰值不对应。

2.3 气溶胶对冰云微物理参数的影响

从4个区域气溶胶光学厚度水平分布(图4)可知，气溶胶光学厚度的大小在0.0~1.2之间。区域Ⅰ和区域Ⅱ部分区域气溶胶光学厚度较高，平均气溶胶光学厚度分别为0.66和0.56，区域Ⅲ和区域Ⅳ位于陆地虽然含有大量大陆性气溶胶粒子，但其气溶胶光学厚度平均值相对较小，分布较为均匀，气溶胶光学厚度分别为0.50和0.48。

冰云的光学厚度影响着太阳短辐射到达地面的大小，图5显示了4个区域冰云光学厚度空间分布，冰云光学厚度的大小在0~15之间。区域Ⅰ和区

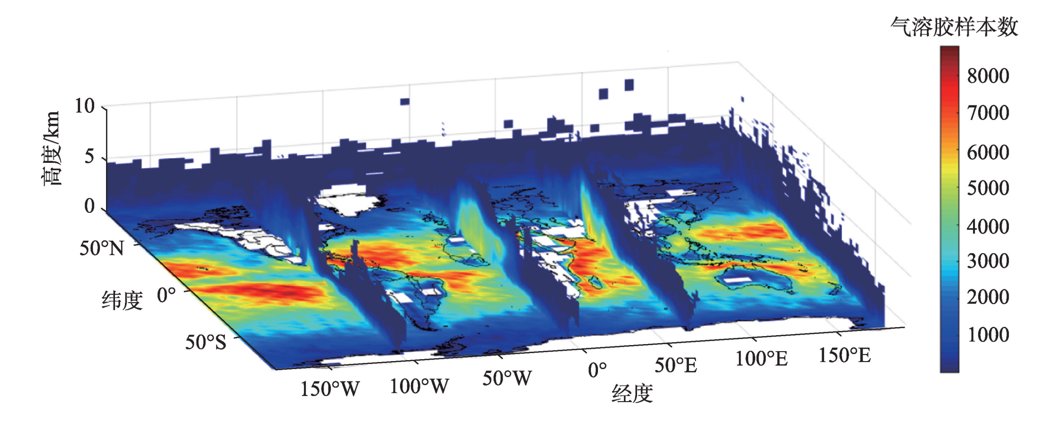


图2 气溶胶样本数的纬度-垂直横截面的年平均全球分布图

Fig. 2 Annual average global distribution of latitude-vertical cross sections of aerosol samples

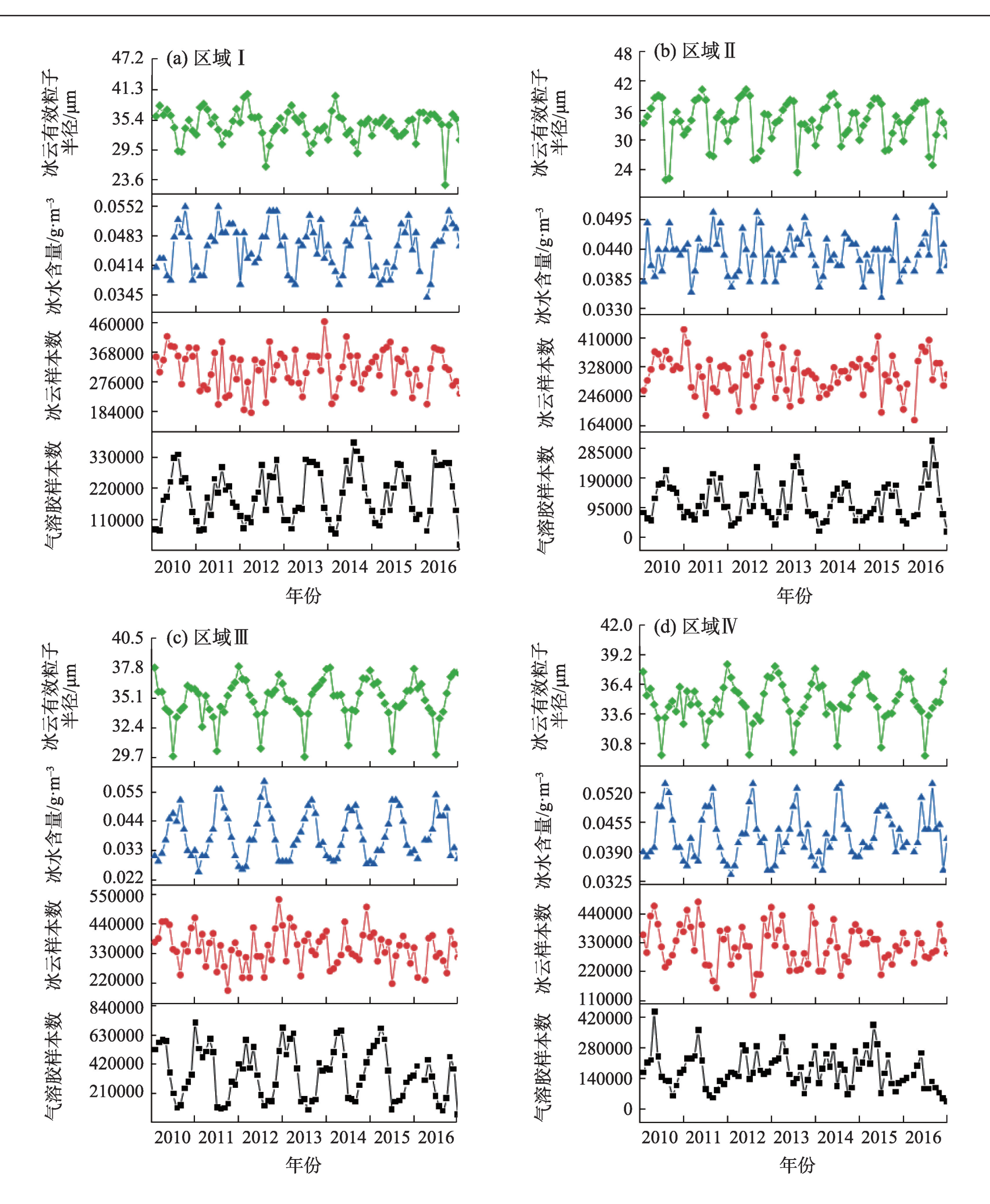


图3 冰云微物理参数和气溶胶样本数的年际变化

Fig. 3 Temporal variation of ice cloud microphysical parameters and aerosol samples

域Ⅱ的冰云光学厚度水平分布较为平均，无明显极值区，平均冰云光学厚度分别为5.1和5.9，区域Ⅲ和区域Ⅳ冰云光学厚度平均值相对较大，分别为8.8和8.6，在52°~56°N之间存在一条极大值带，最大光学厚度为13.4。

由于海面附近海盐粒子较高的原因，区域Ⅰ和区域Ⅱ气溶胶平均光学厚度较高，但区域Ⅰ和区域Ⅱ代表了清洁的海洋环境，即使海面附近存在较多的气溶胶粒子，但是对冰云的影响较小，区域Ⅰ和区域Ⅱ的冰云光学厚度表现出较小的水平；区域Ⅲ和区域Ⅳ存在对冰云影响较大的大陆性气溶胶粒子，它们在冰云形成过程中贡献了较多的冰核，使得区域Ⅲ和区域Ⅳ显示了较高的冰云光学厚度。

图6显示出了0 ℃~−40 ℃之间4个区域的冰云比例(公式1)随温度的变化，温度以5 ℃为间隔。随着温度降低，冰云的比例均呈现增加的趋势，然而4个区域的表现略有不同。相比之下，区域Ⅲ在0 ℃~−40 ℃之间的冰云比例整体上超过了区域Ⅳ和区域Ⅰ，而区域Ⅳ在0 ℃~−40 ℃之间的冰云比例整体上又超过了区域Ⅰ；区域Ⅱ的表现不同于区域Ⅰ，在0 ℃~−10 ℃和−20 ℃~−30 ℃之间的冰云比例处于区域Ⅰ和区域Ⅳ之间，在−10 ℃~−20 ℃之间的冰云比

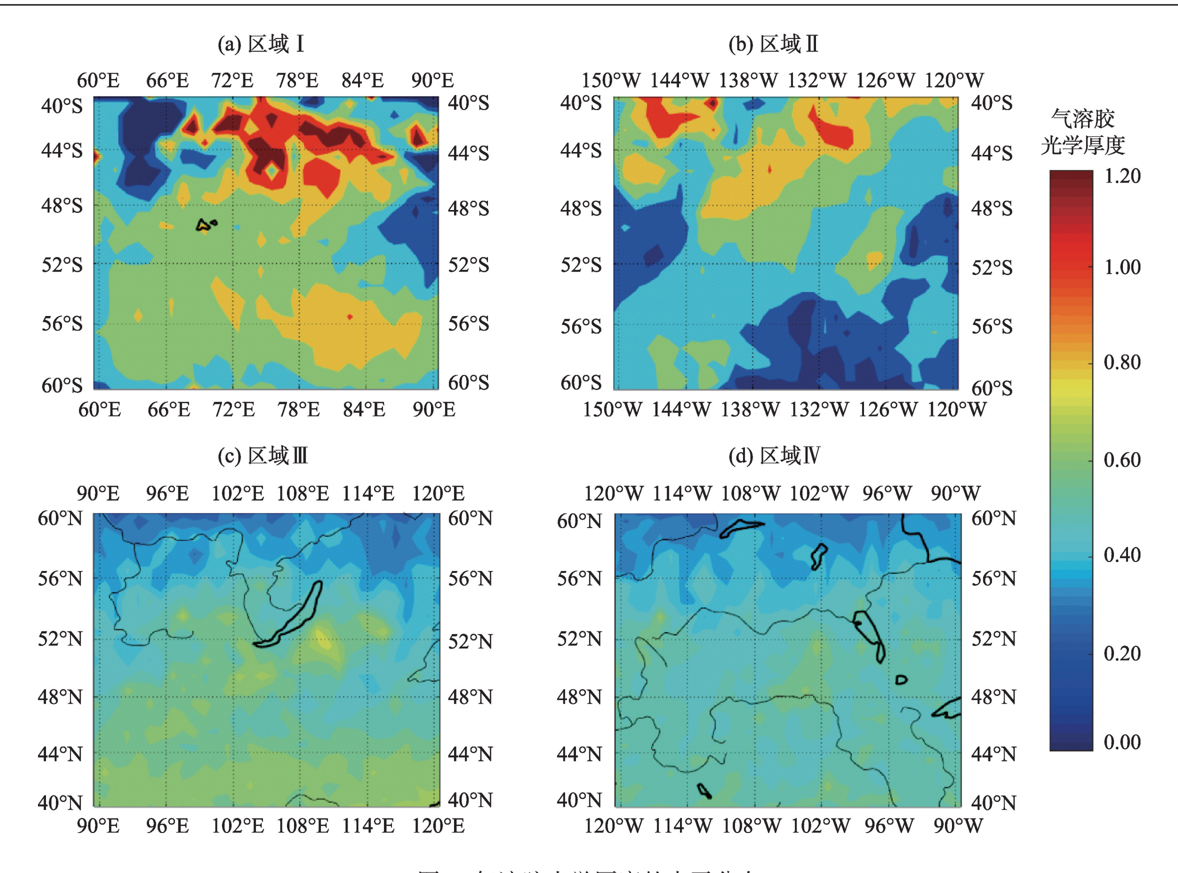


图4　气溶胶光学厚度的水平分布

Fig. 4　Horizontal distribution of aerosol optical thickness

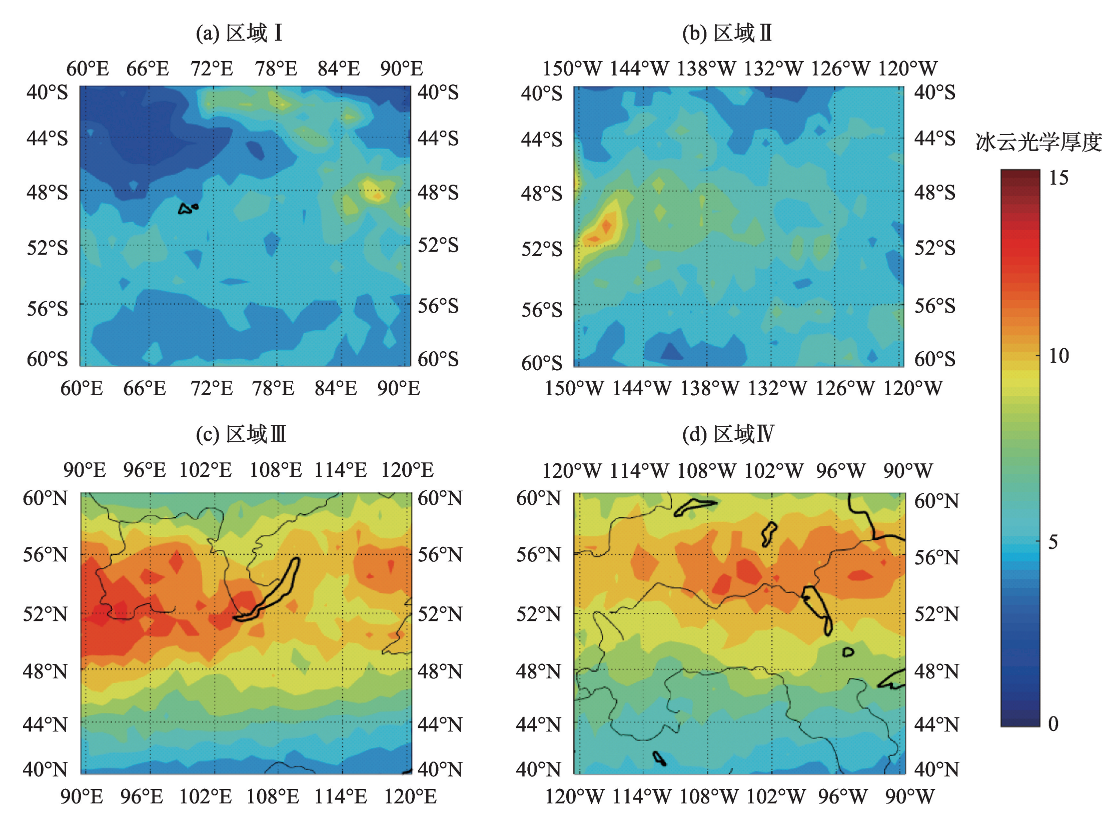


图5　冰云光学厚度的水平分布

Fig. 5　Horizontal distribution of ice cloud optical thickness

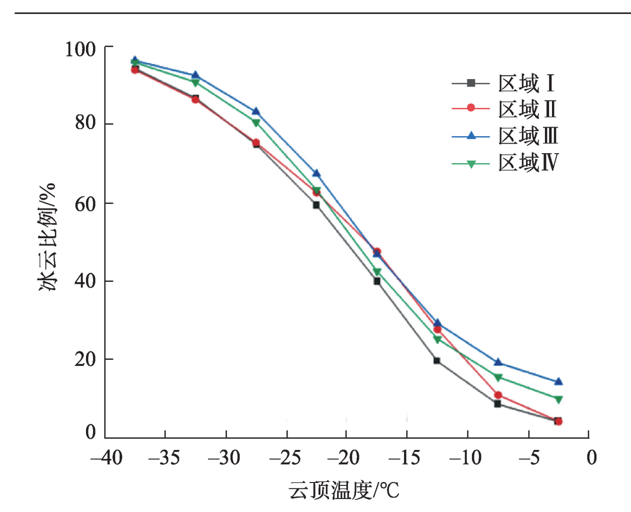


图6　0 ℃~−40 ℃之间冰云比例随云顶温度变化的区域垂直分布图

Fig. 6　Regional vertical distribution of fraction of ice clouds with temperature between 0 ℃ and −40 ℃

例超过了区域Ⅳ但小于区域Ⅲ，−30 ℃~−40 ℃之间的冰云比例与区域Ⅰ趋于相同。虽然区域Ⅱ在−10 ℃~−20 ℃表现出和区域Ⅰ的差异性，但从7 a的整体数据可以看出气溶胶对冰云形成具有明显的贡献，可以确定的是气溶胶促进了0 ℃~−10 ℃和−20 ℃~−40 ℃之间的冰云形成。

气溶胶粒子作为冰核的主要来源，影响冰云的形成，4个区域气溶胶年平均样本数随云顶温度的变化存在明显的差异(图7)。随着云顶温度的降低气溶胶样本数也在减少。在0 ℃~−10 ℃之间的海面附近存在大量海水飞沫，海水飞沫中含有大量硫酸盐和海盐气溶胶粒子，所以在0 ℃~−10 ℃之间可以观察到区域Ⅰ和区域Ⅱ气溶胶样本数较高，甚至区域Ⅰ的气溶胶样本数在部分温度超过了区域Ⅲ和区域Ⅳ；在温度低于−10 ℃以下，由于西风带和干湿沉降的作用，区域Ⅰ和区域Ⅱ的气溶胶样本数明显低于区域Ⅲ和区域Ⅳ，在−25 ℃以下基本接近于0，区域Ⅳ的气溶胶样本数最高，区域Ⅳ仅次之，本研究与Ebert等[22]的研究结果一致。另外，其研究还发现在含有硫酸盐和海盐的粒子群中没有富含冰粒子，表明硫酸盐和海盐粒子对冰核没有贡献。Zobrist等[23]的研究还表明如果可溶性海盐和其他含海洋硫酸盐的颗粒在液滴内，冰晶的形成可能会受到显着抑制。这可以解释在0 ℃~−10 ℃之间区域Ⅰ和区域Ⅱ气溶胶样本数虽然较高但冰云比例较低的原因。

Twohy等[24]的研究指出在一些高污染区，云中液态水含量会减少。该文对冰云冰水含量的研究有类似的结果。冰水含量是反映冰云中含有冰晶质量大小重要物理量，本研究表明气溶胶浓度较低的区域Ⅰ和区域Ⅱ冰水含量高于气溶胶浓度较高的区域Ⅲ和区域Ⅳ(图8)。在0 ℃附近4个区域之间的冰水含量差异最大，区域Ⅰ和区域Ⅱ明显高于区域Ⅲ和区域Ⅳ，区域Ⅰ和区域Ⅱ冰水含量约为0.19 g·m^{-3}，区域Ⅲ的冰水含量为0.12 g·m^{-3}，区域Ⅳ的冰水含量为0.15 g·m^{-3}；随着温度的降低，4个区域的冰水含量逐渐减小，区域之间的差异也减小；温度降低到−40 ℃时，4个区域的冰水含量降低到约0.02 g·m^{-3}，区域之间存在微弱的差异。

Twomey效应[25]指出，当云中液态水含量固定的

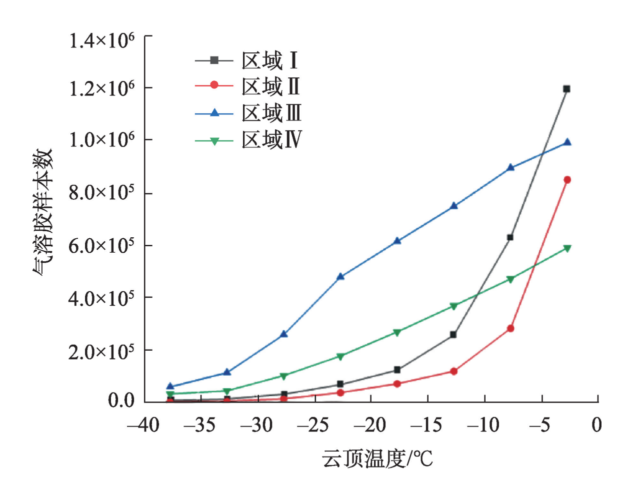


图7　0 ℃~−40 ℃之间气溶胶样本数随云顶温度变化的区域垂直分布图

Fig. 7　Regional vertical distribution of aerosol samples with temperature between 0 ℃ and −40 ℃

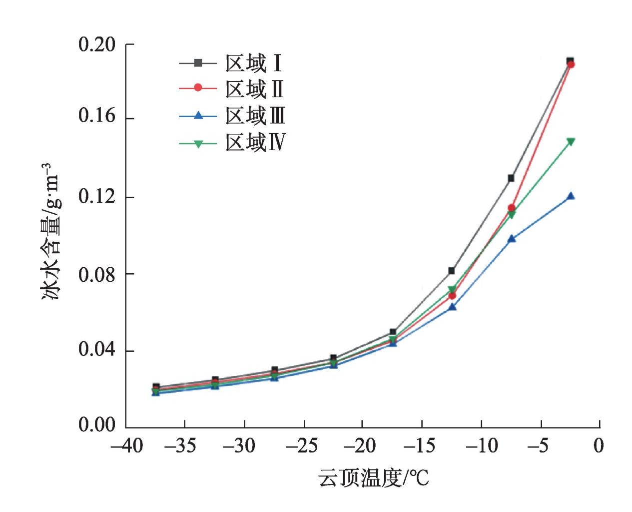


图8　0 ℃~−40 ℃之间冰水含量随云顶温度变化的区域垂直分布图

Fig. 8　Regional vertical distribution of ice water content with temperature between 0 ℃ and −40 ℃

情况下，气溶胶的增多会导致在转化成云凝结核时彼此竞争水汽，使得云滴粒子尺度减小。然而大尺度动力条件和海陆差异会导致不同地区大气中的水汽含量差别巨大，在水汽条件充足的情况下，增多的气溶胶粒子并不总是能够导致云滴粒子尺度的减小。

冰云有效粒子半径是描述冰云微物理特性的重要物理量，图9显示了4个区域冰云有效粒子半径随云顶温度的变化。随着温度降低4个区域的冰云粒子半径均表现出增大趋势；在0 ℃~-15 ℃之间冰云粒子半径表现出：区域Ⅱ>区域Ⅲ>区域Ⅳ>区域Ⅰ，区域Ⅰ和区域Ⅱ在0 ℃~-15 ℃之间气溶胶样本数较多，但是硫酸盐和海盐粒子并不参与形成冰晶，它们不与其他气溶胶粒子竞争水汽，在相同条件下区域Ⅲ和区域Ⅳ存在大量矿物尘埃颗粒，它们互相竞争水汽以形成冰晶，所以区域Ⅱ粒子半径较大，区域Ⅲ和区域Ⅳ较小，区域Ⅰ粒子半径较小的原因可能是存在其他气溶胶粒子的影响；在-15 ℃~-40 ℃之间冰云粒子半径表现出：区域Ⅱ>区域Ⅰ>区域Ⅳ>区域Ⅲ，与图7中-15 ℃~-40 ℃之间气溶胶样本数大小较为符合，满足Twomey效应气溶胶的增多导致转化成冰核时彼此竞争水汽,使冰云粒子尺度减小的原理。

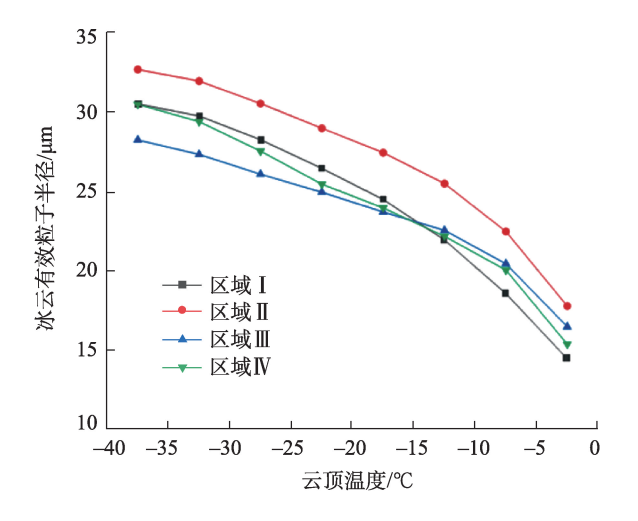


图9 0 ℃~-40 ℃之间冰云有效粒子半径随云顶温度变化的区域垂直分布图

Fig. 9 Regional vertical distribution of ice cloud effective particle radius with temperature between 0 ℃ and -40 ℃

3 结 论

（1）纬度与冰云的分布密切相关。在热带附近的高海拔地区，冰云样本数远高于其他地区，南半球中高纬度地区冰云发生的平均高度相对于北半球更高，随着纬度增加，冰云样本数的最大值和大值区处于的高度逐渐减小。气溶胶在地面附近以赤道为对称的低纬度地区存在极大值，大值区位于海洋上，北半球气溶胶样本数较小的大陆，气溶胶大值区能上升到5 km以上，南半球气溶胶数较高的海洋，气溶胶大值区基本位于海平面附近。

（2）气溶胶样本数与冰云样本数随时间的变化趋势较为一致，冰水含量和冰云有效粒子半径存在相反的关系，气溶胶样本数与冰水含量和冰云有效粒子半径的峰值与谷值在时间上并没有较好的对应。

（3）由于海洋表面气溶胶粒子的原因清洁区域的气溶胶光学厚度较高，但海洋气溶胶粒子对冰云的影响较小，清洁区域表现出较小冰云光学厚度。随着温度降低，气溶胶样本数和冰水含量呈现减小趋势，冰云比例和冰云粒子半径呈现增大趋势；污染区域相对于清洁区域具有较高的气溶胶样本，污染区域0 ℃~-10 ℃和-20 ℃~-40 ℃之间的冰云比例高于清洁区域，清洁区域的冰水含量和冰云有效粒子半径整体表现出高于污染区域。

参考文献（References）

[1] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840. [Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.]

[2] Liou K. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114 (6): 1167-1199.

[3] 杨军, 陈宝军, 银燕. 云降水物理学[M]. 北京: 气象出版社, 2011. [Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan. Physics of clouds and precipitation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.]

[4] Hoose C, Mohler O. Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: A review of results from laboratory experiments[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(20): 9817-9854.

[5] Zhang D, Wang Z, Heymsfield J, et al. Quantifying the impact of dust on heterogeneous ice generation in midlevel supercooled stratiform clouds[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(18): 143-157.

[6] Seifert P, Ansmann A, Mattis I, et al. Saharan dust and heterogeneous ice formation: Eleven years of cloud observations at a central European EARLINET site[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D20): D013222, doi: 10.1029/2009JD0

13222.

[7] 宿兴涛, 许丽人, 魏强, 等. 东亚地区沙尘气溶胶对降水的影响研究[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 211−219. [Su Xingtao, Xu Liren, Wei Qiang, et al. Study of impacts of dust aerosol on precipitation over East Asia[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(1): 211−219.]

[8] Koren I, Kaufman Y J, Rosenfeld D, et al. Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(14): 57−76.

[9] 石睿, 王体健, 李树, 等. 东亚夏季气溶胶—云—降水分布特征及其相互影响的资料分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 12−22. [Shi Rui, Wang Tijian, Li Shu, et al. The spatial and temporal characteristics of aerosol-cloud-precipitation interactions during summer in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 12−22.]

[10] 范学伟, 郑有飞, 王立稳, 等. 基于CALIPSO卫星产品的中国区域异质核化冰云比例差异[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1210−1219. [Fan Xuewei, Zheng Youfei, Wang Liwen, et al. Differences in the fractions of heterogeneous ice clouds over China based on CALIPSO data[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1210−1219.]

[11] 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 983−993. [Yang Lei, Yin Yan, Yang Shaozhong, et al. Characteristics of atmospheric ice nuclei and its relationship to aerosols in winter in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(5): 983−993.]

[12] Wang Wencai, Huang Jianping, Minnis Patrick, et al. Dusty cloud properties and radiative forcing over dust source and downwind regions derived from A-Train data during the Pacific dust experiment [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D4): D014109, doi: 10. 1029/2010JD014109.

[13] 马月, 薛惠文. 利用CloudSat和MODIS数据研究气溶胶对层积云的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(2): 239−245. [Ma Yue, Xue Huiwen. A study of aerosol effects on stratocumulus clouds using CloudSat and MODIS data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(2): 239−245.]

[14] 彭杰, 张华. 典型站点气溶胶对云特性的影响[J]. 大气科学学报, 2015, 38(4): 465−472. [Peng Jie, Zhang Hua. Impact of aerosol on cloud properties at typical sites[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(4): 465−472.]

[15] 郑倩, 郑有飞, 王立稳, 等. 京津冀夏季强降水下冰云宏微观特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 67−76. [Zheng Qian, Zheng Youfei, Wang Liwen, et al. Macrophysical and microphysical properties of ice clouds during heavy rainfalls in Beijing-Tianjin-Hebei region in summer[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 67−76.]

[16] 邓军英, 丁明月, 王文彩, 等. 冰云粒子微物理属性在一次强降雨过程中的垂直分布[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 590−599. [Deng Junying, Ding Mingyue, Wang Wencai, et al. Vertical distributions microphysical properties of ice particles in a heavy rain[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 590−599.]

[17] Mattis I, Müller D, Ansmann A, et al. Ten years of multiwavelength Raman lidar observations of free-tropospheric aerosol layers over central Europe: Geometrical properties and annual cycle [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113 (D20): D009636, doi: 10.1029/2007JD009636.

[18] Bigg E. Ice nucleus concentrations in remote areas[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1973, 30(30): 1153−1157.

[19] 刘刚, 史伟哲, 尤睿. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述[J]. 航天器工程, 2008, 17(1): 78−84. [Liu Gang, Shi Weizhe, You Rui. Cloud-aerosol lidar of America[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(1): 78−84.]

[20] 赵剑, 孙学金, 张日伟, 等. CALIPSO星载激光雷达系统在全球气溶胶探测中的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(1): 50−54. [Zhao Jian, Sun Xuejin, Zhang Riwei, et al. Application of CALIPSO in global aerosol detection[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2014, 31(1): 50−54.]

[21] 杨冰韵, 张华, 彭杰, 等. 利用CloudSat卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1105−1118. [Yang Bingyun, Zhang Hua, Peng Jie, et al. Analysis on global distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on CloudSat data[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 1105−1118.]

[22] Ebert M, Worringen A, Benker N, et al. Chemical composition and mixing-state of ice residuals sampled within mixed phase clouds[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(6): 2805−2816.

[23] Zobrist B, Marcolli C, Peter T, et al. Heterogeneous ice nucleation in aqueous solutions: The role of water activity[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2008, 112(17): 3965−3975.

[24] Twohy C H, Petters M D, Snider J R, et al. Evaluation of the aerosol indirect effect in marine stratocumulus clouds: Droplet number, size, liquid water path, and radiative impact[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D8): D005116, doi: 10.1029/2004JD005116.

[25] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1977, 34(7): 1149−1152.

Aerosols and ice clouds distribution characteristics and effects of aerosols on ice clouds based on satellite data

FAN Xuewei[1], ZHENG Youfei[1,2,3], WANG Liwen[1]

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, Jiangsu, China;
3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract: The interactions between aerosol and clouds have an important impact on the climate system and are significant challenges in climate research. Previous studies discussed the interactions between aerosols and water clouds, but the influence of aerosols on ice clouds was not considered. The present study examined four regions in the northern and southern hemispheres to determine the influence of aerosols on ice clouds from January 2010 to December 2016; the global distribution of ice clouds was also studied. This study applied the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) ice clouds product level-3 data (CAL_LID_L3_Ice_Cloud) and aerosol product level-3 data (CAL_LID_L3_APro) and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) cloud product level-3 data (MOD08_D3) to analyze the influence of aerosols on ice clouds and the global distribution of ice clouds from January 2010 to December 2016. Satellites are a useful tool to detect ice clouds because the thin optical depth, height of ice clouds, aircraft, and ground-based remote sensing are difficult to observe. The four regions were divided into clean and contaminated areas based on the differences in the aerosol sample numbers. The main conclusions were as follows. The latitude is closely related to the distribution of ice clouds. The highest number of ice cloud samples was observed in the high altitude area near the tropics. The maximum number of ice cloud samples and the height of the maximum number decreased gradually as the latitude increased. Different ice cloud samples were obtained from the northern and southern hemispheres. The aerosols showed a maximum near the ground at low latitudes, which was symmetrical at the equator. Aerosols can develop to approximately five kilometers in the northern hemisphere, whereas they develop at approximately three kilometers in the southern hemisphere. The trend of aerosols was consistent with ice clouds; there was an inverse relationship between ice water content and the effective radius of the ice clouds with time. The trend of aerosols did not correspond well to the ice water content and the effective radius of ice clouds. The clean area showed a large aerosol optical thickness due to sea salt particles, but this did not affect the optical thickness of smaller ice clouds in that area. Aerosols promoted ice cloud formation from 0 ℃ to −10 ℃ and −20 ℃ to −40 ℃. The ice water content and effective radius of the ice cloud increased with decreasing temperature. The ice water content and the effective radius of the ice cloud were smaller in the contaminated area than in the clean area.

Key words: ice clouds; aerosol; satellite data; ice water content; effective particle radius